

Perancangan Konsep Mesin Uji Keausan Komponen Prostesis Sendi Pinggul

Tresna Priyana Soemardi^{1#}, Muhamad Lutvi², Agri Suwandi², Anwar Soefi Ibrahim³

¹Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia
Kampus Baru UI Depok Jawa Barat 16424, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin, Universitas Pancasila
Srengseng Sawah Jagakarsa Jakarta 12640, Indonesia

³Departemen Fisika Medis, Universitas Indonesia
Jl. Salemba Raya 4 Kampus UI Salemba Jakarta Pusat 10430, Indonesia
#tsoemardi@eng.ui.ac.id

Abstrak

Prostesis sendi pinggul adalah komponen buatan pengganti sendi pinggul. Penggantian sendi pinggul dilakukan akibat penyakit yang disebut dengan artritis atau karena kecelakaan sendi pada pinggul. Kegagalan pada prostesis, tidak hanya dari faktor pasien maupun proses operasi, tetapi juga dapat terjadi karena faktor material komponen. Salah satu kegagalan faktor material disebabkan karena kurangnya data pengujian mekanis. Pengujian mekanis berfungsi untuk menguji ketahanan material terhadap pembebanan dinamis. Dalam penelitian ini, membahas tentang mesin uji mekanis, yaitu keausan yang disebabkan oleh gesekan komponen yang bergerak. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah merancang konsep mesin uji keausan komponen prostesis sendi pinggul. Mesin uji digunakan untuk menganalisis keausan yang terjadi akibat gesekan komponen *femoral head* dan *acetabular liner*. Konsep rancangan mesin uji mengadopsi standard pengujian keausan ISO 14242-1. Metode perancangan yang digunakan adalah metode *Quality Function Deployment* (QFD) dengan luaran acuan rancangan berupa rumah kualitas atau *House of Quality* (HOQ) untuk mendapatkan persyaratan rancangan konsep mesin uji keausan. Konsep mesin uji keausan yang dihasilkan memiliki 6 stasiun uji dengan gerakan 2 sumbu, yaitu x dan y. Dengan adanya konsep mesin ini diharapkan dapat membantu pengembangan rancangan mesin uji keausan untuk memperoleh hasil prostesis sendi pinggul yang memenuhi standar medis.

Kata kunci: perancangan konsep, QFD, keausan, prostesis, sendi pinggul

Abstract

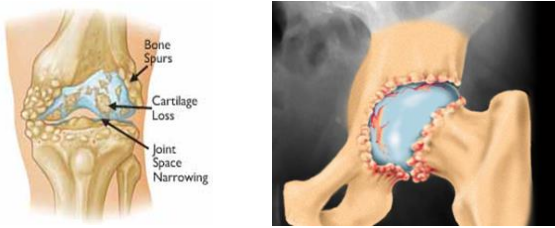
The hip joint prosthesis is an artificial component of the hip joint. Joint replacement due to a disease known as arthritis or joint accidents in the hip. Failure in the prosthesis, not only from patient factors, the operation process and component material factors. One of the causal failure factors is due to lack of mechanical testing data. Mechanical testing serves to prove the resistance of the material to dynamic loading. In this study are discusses the wear testing machine concept the friction of the hip joint prosthesis component based on ISO 14242-1 standard. This machine is applied to analyse the wear caused by the friction of the femoral head and acetabular liner components. The design method used is the Quality Function Deployment (QFD) method with the design reference output in the form of a House of Quality (HOQ) to obtain the design requirements for the concept of a wear testing machine. The idea of the resulting wear testing machine has 6 test stations with 2-axis motion, x and y. With the idea of this machine, it can help develop the design of a wear testing machine to find a hip joint prosthesis according to medical criteria.

Keywords: concept design, QFD, wear, prosthesis, hip joint

I. PENDAHULUAN

Kerusakan akibat keausan terjadi pada sejumlah aplikasi, seperti pesawat terbang, mobil, reaktor nuklir, kontak listrik, dan implan bedah. Pada dunia

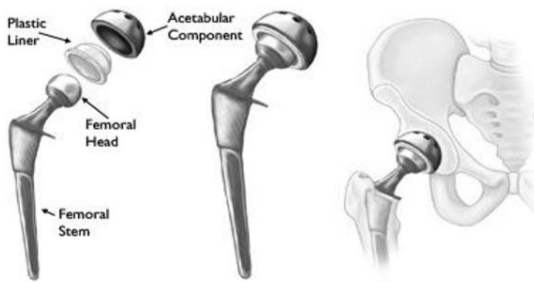
kesehatan, kasus keausan terjadi pada implan, yaitu terjadi gesekan antar komponen, salah satunya adalah *hip joint prosthesis*. *Hip joint prosthesis* merupakan komponen penting dalam sistem kerangka manusia. Sambungan ini terletak diantara



Sendi lutut

Sendi pinggul

Gambar 1. Osteoarthritis pada lutut dan pinggul [2]



Gambar 2. Hip joint prosthesis [3]

pinggul dan pangkal tulang paha atas. *Total hip joint replacement* atau operasi penggantian *hip joint* ini biasanya disebabkan oleh beberapa hal seperti faktor usia, kecelakaan, kekurangan nutrisi dan penyakit tulang (*arthritis*) [1].

Salah satu kerusakan yang paling sering terjadi pada sendi adalah artritis. Dimana artritis merupakan bentuk penyakit sendi yang sering dijumpai dengan bermacam kelainan dan penyebab. Osteoarthritis adalah tipe artritis yang disebabkan oleh kerusakan atau penguraian dan akhirnya kehilangan tulang muda (*cartilage*) dari satu atau lebih sendi-sendi. Osteoarthritis umumnya mempengaruhi sendi-sendi yang menahan beban berat, seperti: lutut (*knee*) dan panggul (*hip*). Osteoarthritis terbagi menjadi dua jenis yaitu primer dan sekunder [2]. Osteoarthritis primer dihubungkan dengan penuaan. Dengan menua, isi air dari *cartilage* meningkat dan susunan protein dari *cartilage* terjadi degenerasi. Akhirnya *cartilage* mengelupas atau membentuk bagian-bagian kecil. Kehilangan *cartilage* menyebabkan gesekan antara tulang-tulang yang dapat menyebabkan nyeri. Osteoarthritis sekunder disebabkan oleh faktor lain, misalnya trauma (kecelakaan), kegemukan, operasi yang berulang ulang, cacat lahir (*abnormal*), diabetes dan penyakit hormon lainnya. Gambar 1 memperlihatkan *osteoarthritis* pada sendi lutut dan pinggul yang disebabkan oleh penuaan. Setiap penyakit yang melibatkan sendi pinggul menyebabkan kesulitan besar dalam berjalan, dan mengakibatkan kecacatan parah. Sendi pinggul adalah sambungan bola antara kepala femoral dan asetabulum di panggul (Gambar 2).

Sendi pinggul adalah sendi bola dan soket yang terdiri dari: (1) batang femoral, (2) kepala femoral, dan (3) komponen asetabular. Gambar 2, menunjukkan komponen *Total Hip Joint Replacement* (THR) [4]. Desain sendi pinggul prosthesis perlu mempertimbangkan komponen yang paling berpengaruh, yaitu *femoral head* dan *acetabular cup*. Prosthesis sendi pinggul terdiri dari dua bagian sentral, komponen femoralis, yang memiliki kepala bola, dan elemen asetabular, yang merupakan cangkang dengan liner soket bagian dalam, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Bola femoralis yang pas di dalam soket adalah untuk memungkinkan artikulasi sendi pinggul seperti bantalan mekanis. Bahan-bahan untuk prosthesis sendi pinggul harus memiliki sifat-sifat berikut [5]:

1. Biokompatibilitas tinggi dengan jaringan dan tulang;
2. Kekuatan mekanik yang memadai, misalnya, modulus *Young* yang sesuai, ketangguhan patah dan hidup kelelahan;
3. Gesekan rendah tetapi ketahanan aus yang tinggi;
4. Stabilitas dan keamanan bahan kimia yang andal.

Biomaterial *hip joint prosthesis* adalah jenis logam, keramik dan UHMWPE (*ultra-high molecular weight polyethylene*). Pemilihan bahan dan desain komponen merupakan faktor penting dalam kinerja dan daya tahan penggantian sendi total. Prosthesis yang longgar menyebabkan nyeri dan fungsi yang terbatas. Akibatnya, sejumlah besar pasien memerlukan operasi revisi, yang rumit dan mahal. Penyebab utama pelonggaran ini adalah reaksi jaringan yang dipicu oleh partikel aus dari gelas *acetabular polyethylene* (UHMWPE) dengan berat molekul sangat tinggi, yang mengarah ke osteolisis di sekitar implant [6]. Keausan *total hip prosthesis* adalah masalah klinis yang signifikan, karena keausan produk implan dapat menyebabkan reaksi jaringan yang merugikan yang dapat menyebabkan kehilangan tulang masif di sekitar implan dan, akibatnya, melonggarnya fiksasi [3]. Oleh karena itu, pentingnya mengetahui tentang karakteristik tribologi prosthesis sendi pinggul untuk mengevaluasi potensi kegagalan model, untuk mengoptimalkan fitur desain, dan meningkatkan kinerja bahan yang digunakan [7].

Kriteria pada alat uji keausan yaitu dapat mengumpulkan informasi mengenai umur berbagai komponen dari setiap mesin manufaktur yang diberikan, dan melakukannya dalam kondisi pengujian yang mensimulasikan kondisi nyata semaksimal mungkin, adalah alat uji yang akan menghasilkan prediksi umur pakai komponen yang

paling dapat diandalkan [8]. Mekanisme keausan akan menjadi alat penyaringan yang berguna untuk membantu memilih bahan yang sesuai untuk pengujian lebih lanjut [9].

Mechanical wear digunakan untuk memprediksi karakteristik salah satu sifat tribologi dari komponen *TKR* dengan simulasi kinematika dan kinetika tubuh manusia dalam kondisi lingkungan yang telah disesuaikan. *Mechanical wear testing* telah dapat mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kondisi dari komponen *tibia* (*polyethylene* material) secara *in vitro* yang pada akhirnya dapat mempengaruhi *in vivo* perilaku *TKR*. Namun menurut Heintze [10], seberapa validnya metode pengetesan tersebut masih dipertanyakan keabsahannya, kurang lebih 80% akurat. *Wear* (keausan) merupakan proses yang kompleks yang tergantung pada banyaknya faktor yang berinteraksi [11]-[13], tetapi beberapa dari pengaruh non-materi yang paling relevan dalam *TKR* adalah jenis gerak geser komponen *tibia* (berbahan dasar *polyethylene*).

Gambar 3 merupakan mesin uji keausan komponen prostesis sendi pinggul yang sudah ada, dengan metode *pin on disk/ball on disk*. Tes *pin-on-disc*, *ball-on-disc*, dan *tribological* untuk *Total Hip Prosthesis* dilakukan dengan menggunakan bahan prostetik Ti-6Al-4V dan paduan Ti-6Al-7Nb, terhadap baja 100Cr6 dan nomor kertas abrasif 320 [14]. Kelemahannya adalah bentuk sample yang diuji tidak berbentuk komponen hip prosthesis. Selain itu jenis kondisi pengujian adalah kering.

Berdasarkan penjelasan sebelumnya, maka tujuan dari penelitian ini adalah merancang konsep mesin uji keausan komponen prostesis sendi pinggul yang memenuhi kriteria standar ISO 14242-1. Adapun karakteristik utama dari mesin pengujian yang di rekomendasikan standar ISO 14242-1, adalah alat uji atau simulator pinggul memiliki 3-sumbu, yang akan mampu menggabungkan gerakan translansi dan rotasi dalam tiga sumbu [15]. Dalam tulisan ini, akan disampaikan langkah-langkah untuk mendapatkan sebuah konsep rancangan mesin uji keausan komponen prostesis sendi pinggul dengan menggunakan metode perancangan *Quality Function Deployment* (QFD).



Gambar 3. *Photography of ball-on-disc contact and tribotester system* [14]

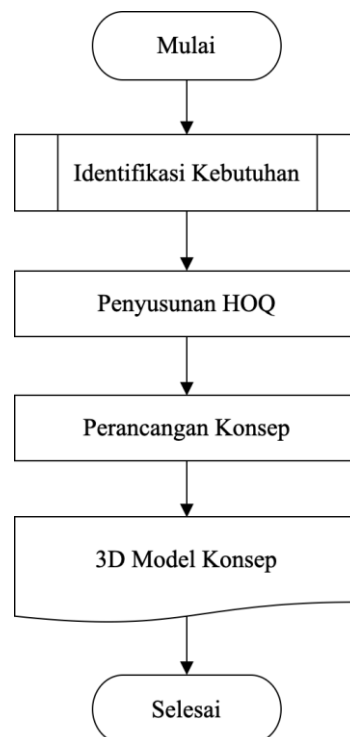
II. METODE PENELITIAN

Metode perancangan yang digunakan untuk menghasilkan konsep mesin uji keausan komponen prostesis sendi pinggul adalah *Quality Function Deployment* (QFD). QFD adalah metode untuk perencanaan dan pengembangan produk atau layanan terstruktur yang memungkinkan pengembangan dapat menentukan dengan jelas keinginan dan kebutuhan pelanggan, untuk kemudian mengevaluasi setiap produk atau kemampuan layanan yang diusulkan secara sistematis dalam hal dampaknya pada pemenuhan kebutuhan tersebut. QFD pada dasarnya adalah proses perencanaan dan manajemen kualitas untuk menuju solusi produk dan layanan terbaik [16].

Langkah-langkah mendasar untuk bagian penting dari proses QFD ini:

1. Mengumpulkan VOC (*Voice of the Customer*),
2. Melakukan analisi VOC (*Voice of the Customer*),
3. Menetapkan kebutuhan prioritas pelanggan,
4. Melakukan validasi kebutuhan pelanggan,
5. Membuat matriks *House of Quality* (HOQ).

HOQ adalah matriks yang sangat kompleks dalam arti terdiri dari beberapa matriks yang saling menempel. Hal pertama dalam menerapkan proses QFD adalah menyusun HOQ. Gambar 4 menampilkan tahapan dari perancangan konsep yang dilakukan dan terdapat tahap penyusunan HOQ.



Gambar 4. Diagram alir perancangan konsep

Berdasarkan Gambar 4, bahwa terdapat beberapa tahapan yang dilakukan untuk mendapatkan konsep rancangan mesin mesin uji keausan komponen prostesis sendi pinggul, yaitu:

1. Identifikasi Kebutuhan, dilakukan dengan melakukan pengambilan data melalui menyebarkan beberapa kuesioner yang berisikan daftar pertanyaan tentang keinginan spesifikasi produk yang akan dibuat, kuisisioner tingkat kepentingan spesifikasi produk, dan kuisisioner perbandingan kompetitor produk yang akan dikembangkan.
2. Penyusunan HOQ, pada langkah ini yaitu mengolah data yang didapat dari hasil kuisisioner dengan membuat HOQ. keluaran dari proses ini ada spesifikasi produk yang diinginkan oleh konsumen.
3. Perancangan Konsep, tahap ini dilakukan perancangan konsep mesin uji keausan komponen prostesis sendi panggul berdasarkan spesifikasi produk yang didapat dari HOQ yang dituangkan ke dalam bentuk gambar 3D Model Konsep.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Identifikasi Kebutuhan Konsumen “Voice of the Customer”

Langkah pertama dalam metode QFD adalah mengumpulkan informasi dari pelanggan tentang persyaratan yang harus dimiliki oleh mesin yang akan dirancang. Untuk mengidentifikasi kebutuhan konsumen dilakukan penyebaran kuisisioner secara daring menggunakan aplikasi *google forms* (dapat dilihat pada Gambar 5). Dari hasil penyebaran kuisisioner responden yang terdiri dari akademisi, dokter ortopedik dan pemerintahan di instansi Kementerian Kesehatan.

Bagian 2 dari 4

PERMINTAAN KUALITAS CUSTOMER

Bapak/Ibu/Sdr/i dapat memilih dan tidak memilih dari beberapa daftar kebutuhan yang telah disediakan. Jika anda memilih "Setuju" maka anda menyetujui permintaan kebutuhan tersebut harus ada pada mesin. Jika anda memilih "Tidak Setuju" maka anda tidak menyetujui atau dirasa tidak terlalu membutuhkan permintaan kebutuhan tersebut harus ada pada mesin.

1. Mesin mudah digunakan *

☐ Setuju

☐ Tidak Setuju

2. Mesin mudah diperbaiki *

☐ Setuju

☐ Tidak Setuju

3. Mesin dapat beroperasi secara terus-menerus *

☐ Setuju

☐ Tidak Setuju

Gambar 5. Tampilan kuisisioner dengan *google forms*

Dari hasil penyebaran kuisisioner didapatkan daftar kebutuhan konsumen yang dapat dilihat pada Tabel 1. Berdasarkan data daftar kebutuhan konsumen yang diperoleh dari kuisisioner permintaan kualitas *customer* maka dapat disusun daftar Permintaan Kualitas *Customer* (PKC) yang didasarkan pada skor tinggi penilaian pilihan konsumen.

Tabel 1. Daftar kebutuhan konsumen

No	Daftar kebutuhan konsumen
1	Mesin tidak sulit dalam perbaikan
2	Mesin mudah digunakan
3	Mesin dapat beroperasi secara terus menerus
4	Umur alat yang panjang
5	Mesin tidak mengeluarkan suara bising dan minim getaran
6	Kecepatan mesin stabil
7	Harga mesin murah
8	Ketersediaan komponen suku cadang mesin
9	Mesin mudah di bersihkan
10	Komponen mesin mudah diganti
11	Perawatan mesin mudah dilakukan
12	Mesin memiliki rangka yang kokoh
13	Mesin memiliki sistem keamanan yang baik terhadap pengoperasian
14	Mesin aman di gunakan
15	Mesin memiliki desain menarik

Tabel 2. Permintaan Kualitas *Customer* (PKC)

No	Permintaan Kualitas Customer (PKC)	Jumlah Pemilih
1	Mesin tidak sulit dalam perbaikan	11
2	Mesin mudah digunakan	11
3	Mesin dapat beroperasi secara terus menerus	10
4	Umur alat yang panjang	11
5	Mesin tidak mengeluarkan suara bising dan minim getaran	11
6	Kecepatan mesin stabil	11
7	Harga mesin murah	11
8	Ketersediaan komponen suku cadang mesin	11
9	Mesin mudah di bersihkan	11
10	Komponen mesin mudah diganti	11
11	Perawatan mesin mudah dilakukan	11
12	Mesin memiliki rangka yang kokoh	10
13	Mesin memiliki sistem keamanan yang baik terhadap pengoperasian	11
14	Mesin aman di gunakan	11
15	Mesin memiliki desain menarik	10

Tabel 3. Pengelompokan Permintaan Kualitas Customer (PKC)

Kelompok	Permintaan Customer
Kelompok 1 : Kinerja	Mesin tidak sulit dalam perbaikan
	Mesin mudah digunakan
	Mesin dapat beroperasi secara terus menerus
Kelompok 2 : Kehandalan	Umur mesin yang panjang
	Mesin tidak mengeluarkan suara bising dan minim getaran
	Kecepatan mesin stabil
Kelompok 3 : Ekonomis	Harga mesin murah
Kelompok 4 : Perawatan	Ketersediaan komponen suku cadang mesin
	Mesin mudah di bersihkan
	Komponen mesin mudah diganti
	Perawatan mesin mudah dilakukan
Kelompok 5 : Ketahanan	Mesin memiliki rangka yang kokoh
Kelompok 6 : Keamanan	Mesin memiliki sistem keamanan yang baik terhadap pengoperasian
	Mesin aman di gunakan
Kelompok 7 : Estetika	Mesin memiliki desain menarik

Dari Tabel 2, maka disimpulkan bahwa dari daftar permintaan kualitas *customer* hampir keseluruhan dipilih oleh responden, maka seluruh daftar permintaan kualitas *customer* tersebut akan menjadi prioritas utama dalam perancangan mesin uji keausan komponen hiprotesis sendi pinggul.

Dari permintaan kualitas *customer* yang di peroleh, maka data-data tersebut dikelompokkan berdasarkan kesamaan atau kemiripan fungsinya (lihat Tabel 3). Dari Tabel 3 didapatkan pengelompokan permintaan kualitas *customer* menjadi 7 kelompok. Pengelompokan PKC bertujuan untuk mengetahui maksud dan keinginan *customer* yang diterjemahkan kedalam fungsi-fungsi pada mesin. Hal ini juga memudahkan dalam melakukan perancangan mesin sesuai dengan pengelompokan PKC.

Setelah didapati pengelompokan umum terhadap data, selanjutnya yaitu tahapan penyusunan prioritas permintaan kualitas dengan menentukan prioritas permintaan kualitas *customer* dengan cara melihat hasil kuesioner yang paling banyak dipilih berdasarkan keinginan pelanggan. Dalam hal ini, dari hasil data kuesioner jumlah permintaan PKC yang terbanyak, sedang dan sedikit maka tersusun penyusunan prioritas permintaan kualitas secara primer, sekunder dan tersier (lihat Gambar 6).

Permintaan Primer	Permintaan Sekunder	Permintaan Tertier
Kelompok 1 : Kinerja	Kelompok 2 : Kehandalan	Kelompok 4 : Perawatan
	Kelompok 4 : Perawatan	Kelompok 5 : Ketahanan
	Kelompok 6 : Keamanan	Kelompok 7 : Estetika

Gambar 6. Penyusunan prioritas permintaan kualitas**Tabel 4. Importance Rating**

No	Permintaan Kualitas Customer (PKC)	Importance Rating
1	Mesin tidak sulit dalam perbaikan	4,45
2	Mesin mudah digunakan	4,54
3	Mesin dapat beroperasi secara terus menerus	4,00
4	Umur mesin yang panjang	4,63
5	Mesin tidak mengeluarkan suara bising dan minim getaran	4,45
6	Kecepatan mesin stabil	4,63
7	Harga mesin murah	4,00
8	Ketersediaan komponen suku cadang mesin	4,63
9	Mesin mudah di bersihkan	4,45
10	Komponen mesin mudah diganti	4,63
11	Perawatan mesin mudah dilakukan	4,72
12	Mesin memiliki rangka yang kokoh	4,10
13	Mesin memiliki sistem keamanan yang baik terhadap pengoperasian	4,72
14	Mesin aman digunakan	4,80
15	Mesin memiliki desain menarik	3,81

Penentuan pengambilan nilai kepentingan (*Importance Rating*) di dapat dari hasil kuesioner dari *customer* terhadap Permintaan Kualitas *Customer* (PKC). Setiap PKC yang telah di identifikasi dihitung nilai kepentingannya dengan sistem penilaian, jika nilai 1 = sangat tidak penting, 2 = kurang penting, 3 = cukup penting, 4 = lebih penting, dan 5 = sangat penting (hasil dapat dilihat pada Tabel 4). Dapat dilihat bahwa, nilai terpenting pada PKC no. 14, yaitu: mesin aman digunakan.

B. Menyusun Planing Matrix

Planning matrix merupakan hasil dari kuesioner penilaian *customer*/responden terhadap produk-produk mesin. Penilaian pada tahap ini menggunakan skala 1 sampai 5 dengan pengertian, nilai 1 = sangat tidak baik, 2 = tidak baik, 3 = cukup baik, 4 = baik, dan nilai 5 = sangat baik.

Tabel 5. Penilaian *competitor* atau produk pesaing

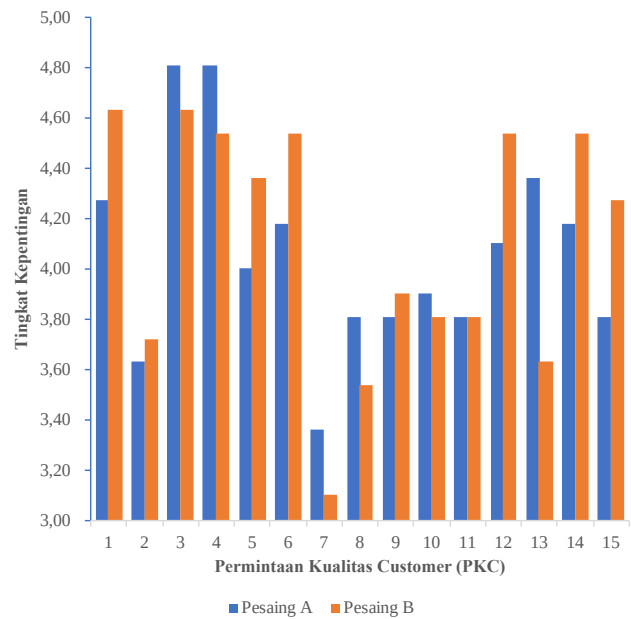
No	Permintaan Kualitas Customer (PKC)	Produk Pesaing A	Produk Pesaing B
1	Mesin tidak sulit dalam perbaikan	4,27	4,63
2	Mesin mudah digunakan	3,63	3,72
3	Mesin dapat beroperasi secara terus menerus	4,81	4,63
4	Umur mesin yang panjang	4,81	4,54
5	Mesin tidak mengeluarkan suara bising dan minim getaran	4,00	4,36
6	Kecepatan mesin stabil	4,18	4,54
7	Harga mesin murah	3,36	3,10
8	Ketersediaan komponen suku cadang mesin	3,81	3,54
9	Mesin mudah di bersihkan	3,81	3,90
10	Komponen mesin mudah diganti	3,90	3,81
11	Perawatan mesin mudah dilakukan	3,81	3,81
12	Mesin memiliki rangka yang kokoh	4,10	4,54
13	Mesin memiliki sistem keamanan yang baik terhadap pengoperasian	4,36	3,63
14	Mesin aman di gunakan	4,18	4,54
15	Mesin memiliki desain menarik	3,81	4,27

Penilaian *competitor*/produk pesaing didapat dari hasil perhitungan kuesioner yang diperoleh dari *customer*/responden terhadap produk-produk pesaing. Penilai *competitor*/produk pesaing dapat dilihat dari Tabel 5.

Setelah penilaian *competitor*/produk pesaing diperoleh, dilanjutkan dengan memasukkan data-data tersebut ke dalam grafik dengan simbol-simbol yang mewakili produk pesaing di lihat pada Gambar 7 untuk memudahkan melihat tren grafik permintaan yang paling dominan diinginkan.

C. Menentukan *Technical Response*

Technical Response merupakan jawaban dari PKC yang di peroleh kemudian di terjemahkan dalam bentuk teknis. Pada tahap ini terdapat target spesifik yang akan dijadikan acuan sebagai pengembangan perancangan konsep berdasarkan yang telah ditetapkan melalui *costumer needs*.

**Gambar 7. Ranking produk****Tabel 6. Penyusunan *Performance* Kualitas Konstruksi (PKK)**

Kriteria	Permintaan Kualitas Customer (PKC)	<i>Performance</i> Kualitas Konstruksi (PKK)
Kinerja	Mesin tidak sulit dalam perbaikan	Susunan sistem dan kontruksi mesin yang tidak rumit
	Mesin mudah digunakan	Menyalakan tombol on/off
	Mesin dapat beroperasi secara terus menerus	Menggunakan energi listrik
Kehandalan	Umur mesin yang panjang	Umur mesin kuat sampai 3-5 tahun
	Mesin tidak mengeluarkan suara bising dan minim getaran	Menggunakan Motor AC Servo dan Pneumatik
	Kecepatan mesin stabil	Pengaturan sistem kerja mesin diatur dengan PLC
Ekonomi	Harga mesin murah	Harga mesin 20 juta

Pada tahap ini dilakukan penterjemahan PKC ke dalam bahasa teknik yaitu PKK seperti yang terlihat pada Tabel 6. Ada 7 kriteria yang diterjemahkan menjadi PKC dan PKK.

Tabel 6. Penyusunan *Performance* Kualitas Konstruksi (PKK) (Lanjutan)

Kriteria	Permintaan Kualitas <i>Customer</i> (PKC)	<i>Performance</i> Kualitas Konstruksi (PKK)
Perawatan	Ketersediaan komponen suku cadang mesin	Memakai produk yang tersedia di pasar lokal
	Mesin mudah di bersihkan	Dimensi
	Komponen mesin mudah diganti	Pemasangan komponen yang mudah
	Perawatan mesin mudah dilakukan	Pembagian sistem kerja komponen dengan masing-masing jalur yang mudah
Ketahanan	Mesin memiliki rangka yang kokoh	Rangka besi kotak untuk mejanya dan alumunium untuk rangka atas dan lengan ayunnya.
Keamanan	Mesin memiliki sistem keamanan yang baik terhadap pengoperasian	Dapat dipantau melalui komputer
	Mesin aman di gunakan	Terdapat tempat duduk atau box sebagai pelindung dan penempatan komponen
Estetika	Mesin memiliki desain menarik	Warna yang terang

D. Menyusun Matrik Korelasi

Pada tahap ini dilakukan penilaian dari penelitian terhadap kekuatan hubungan antara tiap elemen yang terdapat pada *Technical Response* dengan tiap *Customer Needs*, sehingga diketahui apakah *Customer Needs* memiliki hubungan yang kuat, sedang atau lemah dengan *Technical Response*.

Optimasi memiliki tiga simbol yang bertujuan memaksimalkan dan meminimalisir dari *Technical Response* yang diperoleh. Agar peneliti tepat dan fokus dalam mengembangkan perancangan mesin yang harus di optimalkan kinerja dan fungsinya. Simbol optimasi dapat di pada Tabel 7.

Matrik atap adalah sebuah tabel berbentuk segitiga yang digunakan untuk menunjukkan hubungan antar satu *Technical Response* dengan *Technical Response* yang lainnya. Simbol yang digunakan dapat di lihat pada Tabel 8. Gambar 9 menampilkan bentuk optimasi dan matrik atap dari korelasi penilaian.

Tabel 7. Simbol dan keterangan optimasi

Arah Optimasi	Keterangan
↑	Maksimum
↓	Minimum
○	Normal/sudah tepat

Tabel 8. Simbol dan keterangan pada matrik atap

Hubungan antar <i>Technical Response</i>	
(+)	Strong Positif
+	Positif
-	Negative
(-)	Strong Negatif

E. Membuat Relationship

Pada tahap ini dilakukan penilaian dari peneliti terhadap kekuatan hubungan antara tiap elemen yang terdapat pada *Technical Response* dengan tiap *Customer Needs*, sehingga diketahui apakah *Customer Needs* memiliki hubungan yang kuat, sedang atau lemah dengan *Technical Response*.

1. Perbandingan Hubungan PCK dan PKK

Melakukan penilaian antara PKC dan PKK dengan cara memberikan nilai 9 dengan simbol (●) untuk hubungan yang kuat, nilai 3 dengan simbol (○) untuk hubungan sedang dan nilai 1 dengan simbol (Δ) untuk hubungan yang lemah, seperti yang terlihat pada Gambar 10.

2. Penentuan Rangking (Bobot Kolom) PKK

Nilai bobot kolom didapat dari perkalian antara *importance rating* dengan nilai matrik hubungan PKC dan PKK kemudian hasil masing-masing nilai PKK di jumlahkan. Perhitungan bobot kolom menggunakan persamaan sebagai berikut:

Bobot kolom =

$$(\text{importance rating} \times \text{karakteristik teknis}) + \dots n. \quad (1)$$

$$\text{Hasil bobot dalam (\%)} = \frac{\frac{\text{bobot kolom}}{\text{jumlah bobot kolom}}}{100\%} \quad (2)$$

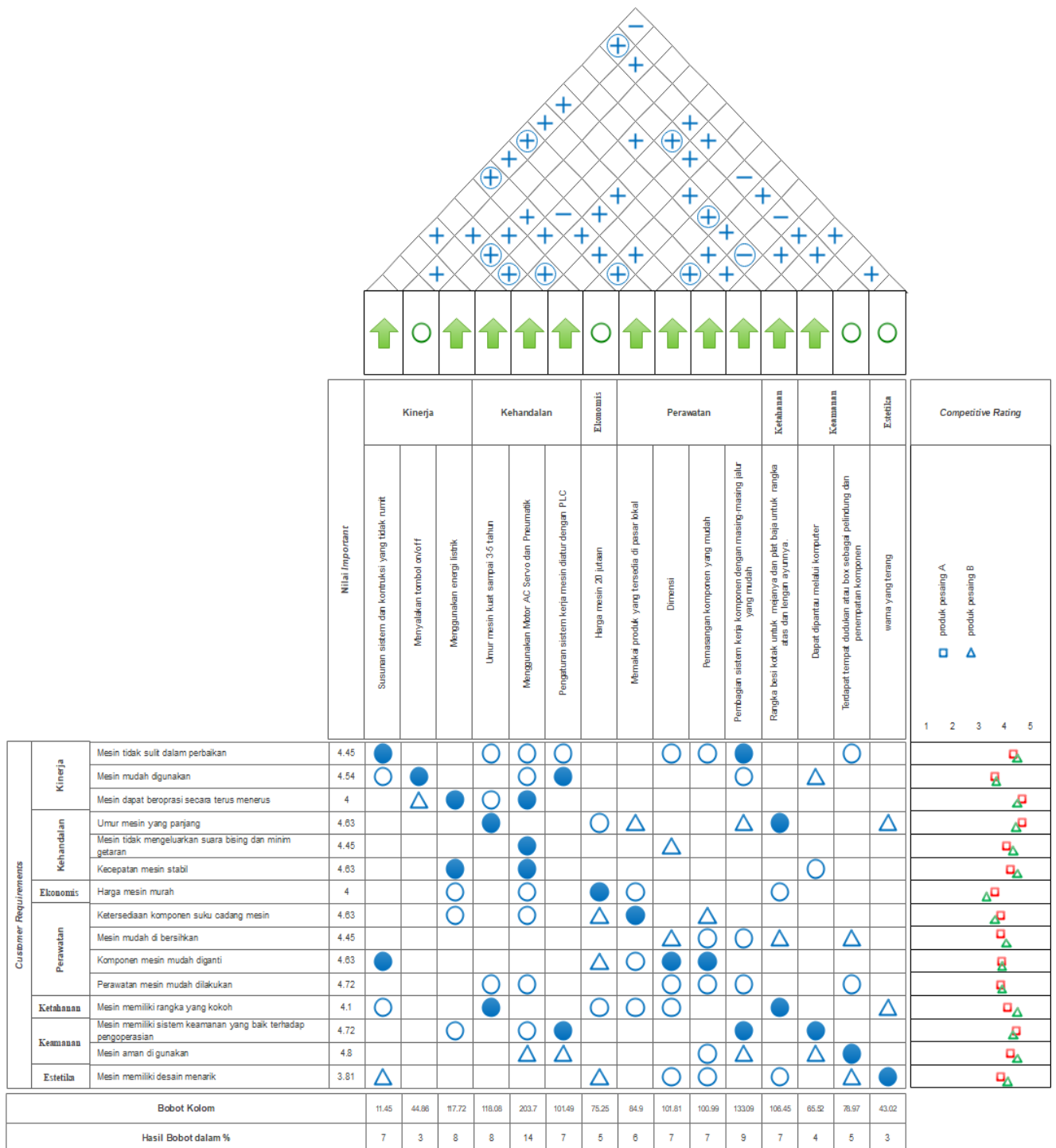
Tabel 9 menampilkan hasil perhitungan bobot PKK dengan menggunakan persamaan (1) dan (2).

Kinerja	Susunan sistem dan kontruksi yang tidak rumit	➡	
	Menyalakan tombol on/off	○	
	Menggunakan energi listrik	➡	
Kehandalan	Umur mesin kuat sampai 3-5 tahun	➡	
	Menggunakan Motor AC Servo dan Pneumatik	➡	
	Pengaturan sistem kerja mesin diatur dengan PLC	➡	
Ekonomis	Harga mesin 20 juta	○	
Perawatan	Memakai produk yang tersedia di pasar lokal	➡	
	Dimensi	➡	
	Pemasangan komponen yang mudah	➡	
Ketahanan	Pembagian sistem kerja komponen dengan masing-masing jalur yang mudah	➡	
	Rangka besi kotak untuk mejanya dan plat baja untuk rangka atas dan lengan ayunnya.	➡	
Keamanan	Dapat dipantau melalui komputer	➡	
	Terdapat tempat duduk atau box sebagai penempatan komponen	○	
Estetika	warna yang terang	○	

Gambar 9. Optimasi dan matrik atap

Customer Requirements			Nilai Important	Kinerja			Kehandalan			Ekonomis	Perawatan				Ketahanan	Keamanan	Estetika	
				Susunan sistem dan konstruksi yang tidak rumit	Menyalakan tombol on/off	Menggunakan energi listrik	Umur mesin kuat sampai 3-5 tahun	Menggunakan Motor AC Servo dan Pneumatik	Pengaturan sistem kerja mesin diatur dengan PLC		Harga mesin 20 jutaan	Memakai produk yang tersedia di pasar lokal	Dimensi	Pemasangan komponen yang mudah				Pembagian sistem kerja komponen dengan masing-masing jalur yang mudah
	Kinerja	Mesin tidak sulit dalam perbaikan	4.45	●			○	○	○			○	○	●				
		Mesin mudah digunakan	4.54	○	●			○	●					○		△		
		Mesin dapat beroperasi secara terus menerus	4		△	●	○	●										
	Kehandalan	Umur mesin yang panjang	4.63				●			○	△			△	●			△
		Mesin tidak mengeluarkan suara bising dan minim getaran	4.45					●				△						
		Kecepatan mesin stabil	4.63			●		●								○		
	Ekonomis	Harga mesin murah	4				○	○		●	○				○			
	Perawatan	Ketersediaan komponen suku cadang mesin	4.63			○		○		△	●		△					
		Mesin mudah di bersihkan	4.45									△	○	○	△		△	
		Komponen mesin mudah diganti	4.63	●						△	○	●	●					
		Perawatan mesin mudah dilakukan	4.72				○	○				○	○	○			○	
		Ketahanan	Mesin memiliki rangka yang kokoh	4.1	○			●			○	○	○			●		
	Keamanan	Mesin memiliki sistem keamanan yang baik terhadap pengoperasian	4.72			○		○	●					●		●		
		Mesin aman di gunakan	4.8					△	△				○	△		△	●	
	Estetika	Mesin memiliki desain menarik	3.81	△						△		○	○		○		△	●

Gambar 10. Perbandingan PKC dan PKK



Gambar 11. HOQ mesin uji keausan komponen prostesis sendi pinggul

Tabel 9. Hasil penentuan rangking (bobot) PKK

PKK	Bobot Kolom	Hasil Bobot (%)
Susunan sistem dan kontruksi mesin yang tidak rumit	111,45	7
Menyalakan tombol on/off	44,86	3
Menggunakan energi listrik	117,72	8
Umur mesin kuat sampai 3-5 tahun	118,08	8
Menggunakan Motor AC Servo dan Pneumatik	203,7	14
Pengaturan sistem kerja mesin diatur dengan PLC	101,49	7
Harga mesin 20 juta	75,25	5
Memakai produk yang tersedia di pasar lokal	84,90	6
Dimensi	101,81	7
Pemasangan komponen yang mudah	100,99	7
Pembagian sistem kerja komponen dengan masing-masing jalur yang mudah	133,09	9
Rangka besi kotak untuk meja nya dan alumunium untuk rangka atas dan lengan ayunnya.	106,45	7
Dapat dipantau melalui komputer	65,52	4
Terdapat tempat dudukan atau box sebagai pelindung dan penempatan komponen	78,97	5
Warna yang terang	43,02	3
Total	1487,30	100

F. Penyusunan House of Quality (HOQ)

Penyusunan HOQ yaitu membuat rumah kualitas atau HOQ yang dibangun berdasarkan matrik-matrik yang telah di buat di bagian pengumpulan dan pengolahan data. Dengan di membangun HOQ, maka peneliti dapat melihat data-data secara keseluruhan mengenai konsep perancangan dan pengembangan yang harus dilakukan pada mesin uji keausan komponen prosthesis sendi pinggul sehingga output yang didapat dari HOQ yaitu menerapkannya dalam bentuk konsep perancangan. Matriks *House of Quality* (HOQ) dapat di lihat pada Gambar 11.

G. Konsep Rancangan

Perancangan mesin uji keausan komponen prosthesis sendi pinggul didasarkan pada standar ISO 14242-1 yang mampu memberikan gerakan 2 sumbu yaitu sumbu X : *Extension-Flexion* (FE) dan sumbu Y : *Abduction-Adduction* (AA). Untuk gerakan *internal-eksternal/rotation* (IE/R) tidak diterapkan pada kinerja mesin karena telah terbukti dari beberapa jurnal internasional yang terkait bahwa gerakan IE/R tidak penting dalam simulasi

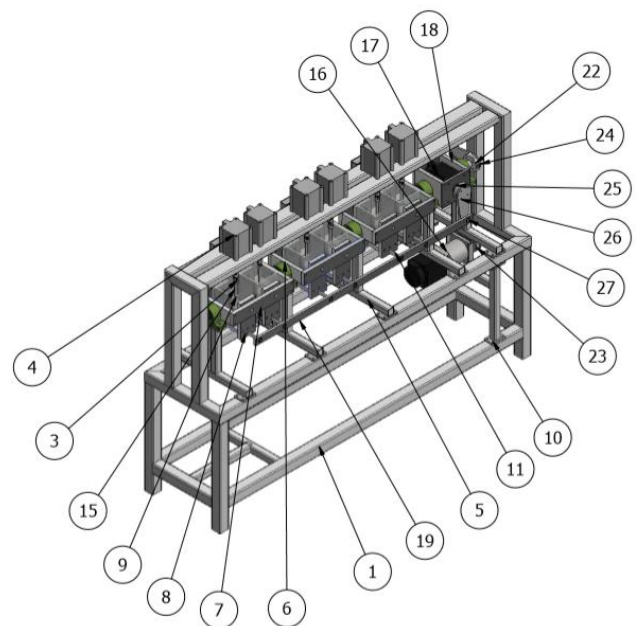
keausan klinis tetapi tetap ada pemberian gaya pada simulator dengan sumbu Z.

Mesin ini memiliki 6 stasiun pengujian, dimana masing-masing stasiun pengujian melakukan gerakan yang seirama. Seluruh desain perancangan mesin dibuat menggunakan *software* Inventor 2019 *study version*. Mesin uji keausan komponen prosthesis sendi pinggul ini terdiri dari tiga set dasar bagian :

1. *Main frame*
2. Penggerak dan *Transmission*
3. *Load System*

Dari pengambilan data QFD dan penyusunan HOQ yang sudah di buat dari sub bab sebelumnya digunakan untuk membuat perancangan mesin uji keausan komponen prosthesis sendi pinggul. Keluaran data QFD dan penyusunan HOQ yang berupa daftar keinginan, diterjemahkan menjadi target spesifikasi yang diperlukan pada mesin seperti motor penggerak, rangka/frame, ukuran dan lain-lain. Spesifikasi tersebut menjadi dasar dalam konsep perancangan yang terdapat pada mesin. Desain mesin dapat di lihat pada Gambar 12.

Dari Tabel 10, didapat susunan daftar komponen mesin, terdapat 27 *part list* yang digunakan dalam konsep rancangan mesin.



Gambar 12. Desain mesin uji keausan komponen prosthesis sendi pinggul

Tabel 10. Part list mesin uji keausan prostesis sendi pinggul

No	Qty	Part Name
1	1	Rangka
2	6	Bearing Linear
3	6	Assembly vertical axis
4	6	Aktuator pneumatic
5	5	Frame
6	5	House bearing
7	3	Assembly ayun sumbu X
8	6	Assembly rangka ayun sumbu Y
9	6	Test Chamber
10	1	Rangka (dudukan motor AC servo)
11	6	Poros lengan ayun
12	1	Poros (1)
13	3	Poros (2)
14	1	Lengan ayun sumbu X
15	6	Vertical loading axis
16	1	Gearbox
17	2	Motor AC servo
18	1	Assembly ayun sumbu motor AC servo
19	1	Lengan ayun sumbu Y
20	1	Poros motor AC servo
21	1	Poros (3)
22	1	Pulley lengan arm sumbu X
23	1	Pulley lengan arm
24	2	Lengan arm sumbu X
25	1	Pulley lengan arm sumbu Y
26	1	Lengan arm
27	2	Bearing d15

IV. KESIMPULAN

Mesin uji keausan prostesis sendi pinggul dirancang mengikuti standar ISO 14242-1. Mesin ini memiliki 6 stasiun pengujian, dimana masing-masing stasiun pengujian melakukan gerakan yang seirama dengan gerakan 2 sumbu yaitu sumbu X : *Flexion and Extension* (FE) dan sumbu Y : *Abduction and Adduction* (A/A). Mesin uji keausan prostesis sendi pinggul ini terdiri dari tiga set dasar bagian yaitu *main frame*, penggerak dan *transmission*, dan *load system*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan penelitian, desain dan pengembangan oleh penulis yang dilakukan dalam tulisan ini didukung oleh hibah penelitian “Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi”, dengan kontrak nomor 8/AMD/E1/KP.PTNBH/2020 dari Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia dan DRPM Universitas Indonesia dengan surat perjanjian penugasan penelitian nomor NKB-359/UN2.RST/HKP.05.00/2020.

REFERENSI

- [1] M. H. Rasyadi and Y. Kaelani, “Analisa Gesekan Material Implantasi Prosthesis Pada Total Hip Joint Replacement Akibat Gerak Adduksi Abduksi Menggunakan Metode Elemen Hingga,” *J. Tek. Pomit*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2014.
- [2] T. P. Soemardi and A. Suwandi, *Inovasi, Perancangan Dan Pengembangan Produk Prosthesis & Orthosis Untuk Rehabilitasi Medik*, 1st ed. Jakarta: UI Press, 2016.
- [3] N. I. Galanis and D. E. Manolacos, “Design of a Hip Joint Simulator According to the ISO 14242,” in *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2011, pp. 1–6.
- [4] A. Suwandi, T. P. Soemardi, G. Kiswanto, W. Kusumaningsih, and I. G. W. Gusti Agung, “Development of friction and wear full-scale testing for TKR prostheses with reliable low cost apparatus,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1933, 2018.
- [5] N. Intanon, C. Saikaew, and P. Srisattayakul, “Design and Fabrication of Wear Testing Machine for a Fishing Net-Weaving Machine Component,” in *Advanced Materials Science and Technology*, 2014, vol. 896, pp. 706–709.
- [6] P. Massin and S. Achour, “Wear products of total hip arthroplasty: The case of polyethylene,” *Morphologie*, vol. 101, no. 332, pp. 1–8, 2017.
- [7] S. G. Ghalme, A. Mankar, and Y. Bhalerao, “Biomaterials in Hip Joint Replacement,” *Int. J. Mater. Sci. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 113–125, 2016.
- [8] T. Priyana Soemardi, A. Suwandi, C. Badri, A. Soefi Ibrahim, S. Kusuma Wijaya, and J. Parlaungan Siregar, “Development of Total Hip Joint Replacement Prostheses Made by Local Material: An Introduction,” *E3S Web Conf.*, vol. 130, 2019.
- [9] K. Ishihara, “Highly lubricated polymer interfaces for advanced artificial hip joints through biomimetic design,” *Polym. J.*, vol. 47, no. 9, pp. 585–597, 2015.
- [10] S. D. Heintze, “How to qualify and validate wear simulation devices and methods,” *Dent. Mater.*, vol. 22, no. 8, pp. 712–734, Aug. 2006.
- [11] B. Denkena, J. Köhler, A. Turger, P. Helmecke, T. Correa, and C. Hurschler, “Manufacturing Conditioned Wear of All-ceramic Knee Prostheses,” *Procedia CIRP*, vol. 5, pp. 179–184, 2013.
- [12] E. W. Patten, D. Van Citters, M. D. Ries, and L. A. Pruitt, “Wear of UHMWPE from sliding, rolling, and rotation in a multidirectional tribo-system,” *Wear*, vol. 304, no. 1, pp. 60–66, 2013.
- [13] F. Liu, M. Wang, J. Wang, and W. Du, “The influence of frontally flat bearing design on contact mechanics and kinematics in total knee joint replacements,” *Tribol. Int.*, vol. 136, pp. 23–30, 2019.
- [14] M. Fella et al., “Tribological behavior of Ti-6Al-4V and Ti-6Al-7Nb Alloys for Total Hip

- Prosthesis,” *Adv. Tribol.*, vol. 2014, p. 451387, 2014.
- [15] R. Sonntag, S. Braun, L. Al-Salehi, J. Reinders, U. Mueller, and J. P. Kretzer, “Three-dimensional friction measurement during hip simulation,” *PLoS One*, vol. 12, no. 9, p. e0184043, Sep. 2017.
- [16] Davide Maritan, *Practical Manual of Quality Function Deployment*. Springer International Publishing, 2015.